

# NYQUIST – SHANNON – KOTĚLNIKOVŮV VZORKOVACÍ TEORÉM TROCHU JINAK, NEBOLI MĚŘIT ANALOGOVĚ NEBO DIGITÁLNĚ? (NYQUIST – SHANNON – KOTELNIK THEOREM, DIGITAL OR ANALOGUE MEASUREMENT?)

*Ivan Uhlíř<sup>1</sup>, Milan Daneček<sup>2</sup>, Adam Kouba<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Ústav přístrojové a řídicí techniky, FS ČVUT v Praze

<sup>2</sup> Ústav přístrojové a řídicí techniky, FS ČVUT v Praze

<sup>3</sup> Ústav přístrojové a řídicí techniky, FS ČVUT v Praze

*Abstrakt: Článek se problémy digitálních elektroměrů s odkazem na zjištěními studie zveřejněná autory University of Twente ve spolupráci s Amsterdam University of Applied Science. Studie se popisuje rozdíly v měření při použití elektromechanického a digitálního domovního elektroměru. Měření provedená autory ukazují, že digitální elektroměr je ovlivněn elektromagnetickou interferencí, která může vést k chybnému odečtu měřené elektrické energie.*

*Klíčová slova: Elektromechanický elektroměr, Digitální elektroměr, Elektromagnetické kompatibilita, Interference*

*Abstract: This paper is focused on problems of digital energy meters with link to findings in a study carried out by the University of Twente., in collaboration with the Amsterdam University of Applied Science. Study describes differences in measurement between electromechanical energy meters and electronic energy meters. Measurements taken by authors show, that electronic energy meters are affected by electromagnetic interference, which can lead to false readings.*

*Keywords: Electromechanical energy meter, Electronic energy meter, Electromagnetic compatibility, Interference*

## 1 Úvod

V Holandsku se rozrůstá aféra, ve které drobní spotřebitelé elektrické energie protestují u některých elektrorozvodných společností proti namontování digitálních elektroměrů. K výměně analogových „kotoučkových“ elektroměrů pracujících s indukčním měřicím systémem (Ferraris) za digitální elektroměry s dálkovým odečtem došlo zejména v souvislosti s instalací solárních panelů s měniči. Po této modernizaci, která měla vést ke snížení odebírané energie o energii ze solárních panelů, došlo naopak k výraznému nárůstu naměřených a fakturovaných hodnot odběru. Vyjasnění a řešení rozporu se ujala také publikace [1] tří autorů z renomovaných holandských universit a dalších navazujících článků [3-5].

## 2 Rozbor problematiky

Autoři v [1] provedli současná měření několika elektroměry obou různých systémů a došli k šokujícímu, ale objektivnímu zjištění, naměřené údaje se liší až o 250%. Autoři vysvětlují vznik chyby u digitálního elektroměru porušením komparace úrovně analogových veličin napětí a proudů vlivem obsahu vyšších harmonických jejich průběhů v síti. Nárůst vyšších harmonických v sítích je způsoben stále častějším používáním nekonvenčních

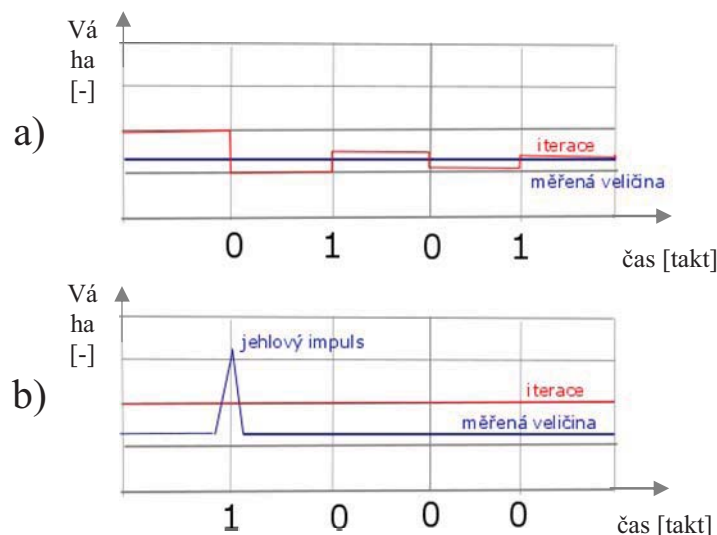
spotřebičů pracujících na síti: již zmíněných DC/AC měničů solárního systému, ale také úsporných fluorescenčních a LED svítidel s měniči. Vysvětlení je v podstatě správné, ale autoři nevysvětlují proč je digitálně naměřená hodnota vždy vyšší než hodnota správné, tedy nevysvětlují proč je okrádán spotřebitel, proč se chyby nahoru a dolů nevyrovnají.

Používané jednoduché měniče v patičkách tzv. úsporných a LED svítidel jsou často mimo normu elektromagnetické kompatibility tím, že působí velmi úzké jehlové impulsy. Obzvláště úzké jsou impulsy, které působí jiskřením komutátorové motory ve vysavačích, pračkách, atd. Jehlové impulsy jsou sice energeticky ve spektru zcela nevýznamné, ale mohou významně narušit vzorkovací proces A/D převodníku, obzvláště je-li použit převodník zpětnovazební s iteračním programem.

### 3 Původ kladné chyby měření

K vysvětlení vnitřní funkce běžného zpětnovazebního A/D převodníku s iteračním programem, který je nejčastěji používaným slouží Obr. 1. Na Obr. 1 je znázorněn příklad jeho funkce, když je měřená hodnota proudu ve spodní části rozsahu. To je nejčastější případ při měření elektroměrem v domácnosti, průměrné využití proudového rozsahu elektroměru v domácnosti je ve skutečnosti jen několik procent.

Předpokládejme, že přijde úzký, jehlový impuls na vstup A/D převodníku v rozhodném okamžiku, ve kterém komparátor vyhodnocuje relaci měřeného vstupního napětí a napětí kompenzačního z A/D bloku ovládaného iteračním programem, dojde vždy k přečtení hodnoty 1, tak jako by napětí měřeného vstupu bylo větší než napětí kompenzační. Takto vzniklá „falešná“ jednička v nejvyšším, nebo některém z vysokých binárních řádů nemůže být v již započatém měření – vzorkování opravena. Proto je chyba měření ve spodní části rozsahu digitálního elektroměru vždy kladná.



Obr. 1: a) Příklad správné funkce A/D převodníku; b) Příklad funkce převodníku při jehlovém impulsu

Jak lze takové chybě zabránit:

- Je třeba zabránit proniknutí ostrých rušivých impulsů do A/D převodníku. Tedy plně vyřešená elektromagnetická kompatibilita. To v silových rozvodech není levné a často to ani není možné.
- Analogovým filtrem na vstupu převodníku, který bude mít na frekvenci taktů A/D převodu útlum větší než je poměr amplitudového inkrementu měření k rozsahu měření.
- Použití jiného iteračního programu, který by pracoval „od shora“ nebo některého z integračních převodníků.

### 4 Vzorkovací teorém ve výuce fakulty strojní

V naší výuce reprezentuje vztah pro vzorkovací frekvenci Shannon – Kotělnikovův vzorkovací teorém:

$$f_{\text{vzorkovací}} \geq 2 \cdot f_{\text{max}} \quad (1)$$

Pro sinusový pozorovaný průběh  $f_{max}$  se pro rovnost ve vzorci umístí vzorkovací bod střídavě na maximum a minimum sinusového průběhu. Pomlčíme o případu, kdy vzorkovací body jsou umístěny v průchodech nulou,  $0, \pi, 2\pi, 3\pi$ , atd. K tomu dodáme, že toto je krajní případ, že ve skutečnosti je třeba volit vzorkovací frekvenci  $5x, 10x, 20x \dots$  atd. vyšší, než je nejvyšší harmonická obsažená v signálu. Ale co je nejvyšší harmonická obsažená v signálu? Jak je definován její útlum proti základní harmonické? Náš odhad je opřen o to, že amplitudy harmonických musí jen ubývat s jejich násobkem základní frekvence, to však není vždy pravda. Přesnější rozbor zájemce najde např. i na Wikipedii [2]. Přesný rozbor je sice pro náš rozsah základní výuky příliš obsáhlý, ale aby uživatel nepadl do omylu, je třeba jej varovat, že výklad  $f_{max}$  není radno zjednodušovat na jednoduchý odhad.

Dále je potřeba zdůraznit, že po dobu převodu se nesmí vzorkování signálu měnit více, než o uvažovaný inkrement měření a to ani sebe kratší dobu.

## 5 Závěr

Na základě výše uvedených úvah, se autorská skupina již delší dobu pro měření elektrických výkonů úspěšně používá raději analogového násobení veličin fázových napětí a fázových proudů a jejich dalšího analogového zpracování z fázových výkonů až pro celkový činný a jalový výkon v energetických soustavách.

### Poděkování

Publikace byla vytvořena za podpory interního grantu SGS17/071/OHK2/1T/12: Měření dynamických vlastností fázorů v okrsku elektrovodné sítě a grantu SGS15/062/OHK2/1T/12: Analogový měřicí převodník elektrických výkonů

### Literatura

- [1] LEFERINK F., KEYER C., MELENTJEV A.: Static Energy Meter Errors Caused by Conducted Electromagnetic Interference. In: IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine – 2016, Volume 5 – Quarter 4
- [2] [https://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist%E2%80%93Shannon\\_sampling\\_theorem](https://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist%E2%80%93Shannon_sampling_theorem)
- [3] [http://m.nzherald.co.nz/business/news/article.cfm?c\\_id=3&objectid=11816828](http://m.nzherald.co.nz/business/news/article.cfm?c_id=3&objectid=11816828)
- [4] <https://www.utwente.nl/en/news/1/2017/3/313543/electronic-energy-meters-false-readings-almost-six-times-higher-than-actual-energy-consumption>
- [5] <http://automatizace.hw.cz/nektre-elektromery-meri-az-6x-vetsi-spotrebu-nez-je-skutecnost.html>



**Selected article from**  
**Tento dokument byl publikován ve sborníku**

**Nové metody a postupy v oblasti přístrojové techniky,  
automatického řízení a informatiky 2017**  
**New Methods and Practices in the Instrumentation,  
Automatic Control and Informatics 2017**  
**29. 5. – 30. 5. 2017, Svatý Jan pod Skalou**

**ISBN 978-80-01-06300-2**

**Web page of the original document:**  
<http://control.fs.cvut.cz/nmp>  
<http://iat.fs.cvut.cz/nmp/2017.pdf>

**Obsah čísla/individual articles:**  
<http://iat.fs.cvut.cz/nmp/2017/>